

# Índice general

<b>1. Introducción a la Automática</b>	<b>9</b>
1.1. Definición de señales y sistemas . . . . .	9
1.2. Elementos de un sistema controlado . . . . .	11
<b>2. Modelado de señales</b>	<b>13</b>
2.1. Medición de señales . . . . .	13
2.2. Funciones causales . . . . .	15
2.3. Señales de entrada básicas . . . . .	16
2.4. Señales en el dominio de Laplace . . . . .	18
2.4.1. Combinación lineal de señales . . . . .	19
2.4.2. Derivación e integración de señales . . . . .	19
2.4.3. Señales retrasadas en el tiempo . . . . .	19
2.4.4. Cálculo de la función temporal conocida la función de Laplace . . . . .	20
2.4.5. Cálculo del valor inicial y final de una señal . . . . .	22
2.5. Señales de salida de los sistemas . . . . .	23
<b>3. Modelado de sistemas</b>	<b>27</b>
3.1. Función de transferencia . . . . .	27
3.2. Señales internas . . . . .	30
3.3. Sistemas con varias salidas . . . . .	32
3.4. Sistemas con varias entradas . . . . .	35
3.5. Subsistemas y diagramas de bloques . . . . .	37
3.6. Simplificación gráfica de diagramas . . . . .	39
3.6.1. Bloques en serie . . . . .	39
3.6.2. Bloques en paralelo . . . . .	39
3.6.3. Bloques en lazo . . . . .	40
3.6.4. Operaciones que no modifican los diagramas . . . . .	41
3.7. Simplificación analítica de diagramas . . . . .	42
3.8. Polos y ceros de la función de transferencia . . . . .	44
3.9. Ejercicios propuestos . . . . .	44
<b>4. Respuesta temporal</b>	<b>49</b>
4.1. Sistemas de primer orden . . . . .	49
4.1.1. Respuesta ante entrada impulso . . . . .	50
4.1.2. Respuesta ante entrada escalón . . . . .	51
4.1.3. Respuesta ante entrada rampa . . . . .	52
4.1.4. Respuesta ante entrada sinusoidal . . . . .	53
4.1.5. Ejemplos de sistemas de primer orden . . . . .	54
4.2. Sistemas de segundo orden . . . . .	55

4.2.1.	Respuesta subamortiguada ante entrada escalón . . . . .	55
4.2.2.	Respuesta sobreamortiguada ante entrada escalón . . . . .	61
4.2.3.	Respuesta críticamente amortiguada ante entrada escalón . . . . .	63
4.2.4.	Respuesta oscilatoria ante entrada escalón . . . . .	63
4.2.5.	Respuesta ante entrada impulso . . . . .	64
4.3.	Sistemas de tercer orden . . . . .	65
4.3.1.	Polos complejos dominantes . . . . .	65
4.3.2.	Polo real dominante . . . . .	66
4.4.	Sistemas de orden superior . . . . .	66
4.5.	Influencia de los ceros . . . . .	67
4.6.	Sistemas de fase no mínima . . . . .	68
4.7.	Ejercicios propuestos . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Estabilidad</b> . . . . .	<b>75</b>
5.1.	Definición de estabilidad . . . . .	75
5.2.	Condición de Cardano-Viète . . . . .	76
5.3.	Criterio de Routh-Hurwitz . . . . .	77
5.3.1.	Estabilidad de los sistemas de segundo orden . . . . .	78
5.3.2.	Estabilidad de los sistemas de tercer orden . . . . .	78
5.3.3.	Ejemplo de sistema de cuarto orden . . . . .	79
5.4.	Casos especiales del criterio de Routh-Hurwitz . . . . .	79
5.4.1.	Se anula el primer coeficiente de una fila . . . . .	79
5.4.2.	Se anula toda una fila . . . . .	80
5.5.	Ejercicios resueltos . . . . .	81
5.6.	Ejercicios propuestos . . . . .	82
<b>6.</b>	<b>Error en régimen permanente</b> . . . . .	<b>93</b>
6.1.	Definición de error en régimen permanente . . . . .	93
6.2.	Error en sistemas con realimentación negativa unitaria . . . . .	94
6.2.1.	Error de posición . . . . .	95
6.2.2.	Error de velocidad . . . . .	95
6.2.3.	Error de aceleración . . . . .	96
6.2.4.	Tabla resumen de errores . . . . .	96
6.3.	Magnitud y unidades del error . . . . .	97
6.4.	Error en sistemas con realimentación no unitaria . . . . .	98
6.5.	Error en sistemas con varias entradas . . . . .	99
6.6.	Ejercicios resueltos . . . . .	100
6.7.	Ejercicios propuestos . . . . .	102
<b>7.</b>	<b>Lugar de las raíces</b> . . . . .	<b>111</b>
7.1.	Introducción . . . . .	111
7.2.	Condición del módulo y condición del ángulo . . . . .	113
7.3.	Método para dibujar el lugar de las raíces . . . . .	114
7.4.	Ejemplos de lugares de las raíces . . . . .	116
7.4.1.	Ejemplo de sistema de tercer orden . . . . .	116
7.4.2.	Ejemplo de sistema de segundo orden con un cero . . . . .	118
7.5.	Lugar de las raíces en función de cualquier parámetro . . . . .	120
7.6.	Ejercicios propuestos . . . . .	125

<b>8. Respuesta en frecuencia</b>	<b>135</b>
8.1. Respuesta a una entrada sinusoidal . . . . .	135
8.2. El diagrama de Bode . . . . .	136
8.3. Diagramas de Bode de sistemas elementales . . . . .	137
8.3.1. Ganancia . . . . .	137
8.3.2. Retraso en el tiempo . . . . .	138
8.3.3. Integrador . . . . .	139
8.3.4. Derivador . . . . .	139
8.3.5. Sistema estable de primer orden y ganancia estática unidad . . . . .	140
8.3.6. Sistema de segundo orden subamortiguado y ganancia estática unidad . . . . .	144
8.4. Diagrama de Bode de cualquier función de transferencia . . . . .	147
8.5. Ancho de banda . . . . .	148
8.6. Margen de ganancia y margen de fase . . . . .	149
8.6.1. Ganancia crítica . . . . .	151
8.6.2. Retraso temporal máximo . . . . .	152
8.7. Ajuste de un controlador proporcional . . . . .	152
8.7.1. Especificaciones transitorias en el dominio de la frecuencia . . . . .	153
8.8. Ejercicios propuestos . . . . .	154
<b>9. Controladores PID</b>	<b>159</b>
9.1. Expresión general del controlador PID . . . . .	159
9.1.1. Forma estándar . . . . .	159
9.1.2. Forma paralela . . . . .	160
9.1.3. Forma serie . . . . .	161
9.2. Controladores P, PD y PI . . . . .	161
9.2.1. Actuación proporcional . . . . .	161
9.2.2. Actuación proporcional-derivativa . . . . .	162
9.2.3. Actuación proporcional-integral . . . . .	163
9.3. Ajuste experimental del PID . . . . .	165
9.3.1. Ajuste de Ziegler-Nichols . . . . .	165
9.3.2. Otros ajustes experimentales . . . . .	168
9.3.3. Ejemplo comparativo . . . . .	169
9.4. Ajuste analítico del PID por asignación de polos . . . . .	170
9.5. Control con dos grados libertad . . . . .	171
9.6. Modificaciones del PID . . . . .	172
9.6.1. Supresión del efecto kick-off . . . . .	172
9.6.2. Set-point weighting . . . . .	173
9.6.3. Filtro de la derivada . . . . .	174
9.6.4. Prevención del efecto windup integral . . . . .	176
9.7. Implementación práctica del controlador PID . . . . .	179
9.7.1. Circuito eléctrico . . . . .	179
9.7.2. Rutina en código C . . . . .	180
9.8. Ejercicios propuestos . . . . .	181
<b>A. Utilidades de Matlab</b>	<b>193</b>
A.1. Definición de funciones de transferencia . . . . .	193
A.2. Respuesta temporal de sistemas . . . . .	194
A.3. Respuesta frecuencial de sistemas . . . . .	195
A.4. Lugar de las raíces . . . . .	195
<b>B. Tablas de caracteres</b>	<b>197</b>